



(10) **DE 10 2012 214 019 B3** 2013.11.07

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2012 214 019.0**

(22) Anmeldetag: **07.08.2012**

(43) Offenlegungstag: —

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **07.11.2013**

(51) Int Cl.: **G01N 21/55 (2012.01)**

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,  
51147, Köln, DE**

(74) Vertreter:  
**von Kreisler Selting Werner, 50667, Köln, DE**

(72) Erfinder:  
**Meyen, Stephanie, Almeria, ES; Heller, Peter,  
Dr., Retamar, ES; Hagmann, Martin, 71083,  
Herrenberg, DE**

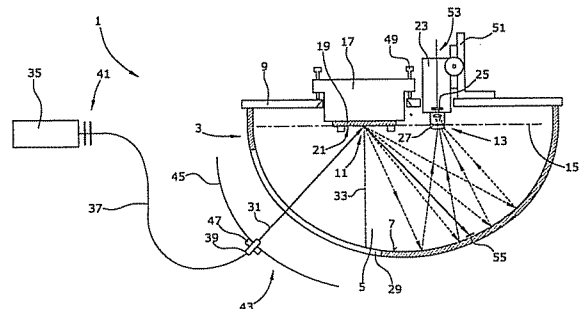
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

**US 6 577 397 B1**

**Ward, Gregory J.: Measuring and Modeling  
Anisotropic Reflection. In: Computer Graphics 26,  
2. July 1992, 265-272.**

(54) Bezeichnung: **Messsystem zur Bestimmung von Reflexionscharakteristiken von Solarspiegelmaterialien und  
Verfahren zur Qualitätsbestimmung einer Spiegelmaterialprobe**

(57) Zusammenfassung: Ein Messsystem (1), das insbesondere zur Bestimmung von Reflexionscharakteristiken von Solarspiegelmaterialien geeignet ist, weist einen Spiegelhalter (17) zur Aufnahme einer Spiegelmaterialprobe (19), einen Strahlungsdetektor (23) mit Bildsensor (25) und einer Empfangsoptik (27) zur Aufnahme von von der Spiegelmaterialprobe (19) reflektiertem Licht, eine Haube (3), die einen Innenraum (5) und die eine verspiegelte Innenfläche (7) aufweist, auf, wobei die verspiegelte Innenfläche (7) semi-ellipsoid-förmig ausgebildet ist und einen ersten Brennpunkt (11) und einen zweiten Brennpunkt (13) aufweist, wobei der erste und der zweite Brennpunkt (11, 13) in dem Innenraum (5) der Haube (3) angeordnet sind, wobei die Spiegelmaterialprobe (19) über den Spiegelhalter (17) in dem ersten Brennpunkt (11) anordenbar ist und die Empfangsoptik (27) des Strahlungsdetektors (23) in dem zweiten Brennpunkt (13) angeordnet ist, mit einer Lichtquelle (35) und einem mit der Lichtquelle (35) verbundenen Strahlungseinkoppler (39) zur Erzeugung eines auf die Spiegelmaterialprobe (19) gerichteten Lichtstrahls (31), wobei der Strahlungseinkoppler (39) an einer Führungsvorrichtung (43) zur Führung des Strahlungseinkopplers (39) entlang einer vorgegebenen Führungsbahn (45) angeordnet ist, und wobei die Haube (3) mindestens eine Aussparung (29) oder mindestens einen transparenten Bereich aufweist, über den der Lichtstrahl (31) in den Innenraum (5) der Haube (3) einleitbar ist.



### Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Messsystem zur Bestimmung von Reflexionscharakteristiken von Solarspiegelmaterien.

**[0002]** In modernen Solarkraftwerken werden häufig konzentrierende Spiegel eingesetzt. Bei der Auslegung von Solarkraftwerken ist daher die Reflexionscharakteristik unterschiedlicher Spiegel von Interesse, um unterschiedliche Spiegelmaterien vergleichen zu können. Die eingesetzten Solarspiegelmaterien sind hochgradig spiegelnd. Zumeist handelt es sich um versilberte Glasspiegel, gerollte und polierte Aluminium- oder Metallspiegel, Polymerschichtsysteme und andere hochgradig spiegelnde Spiegelmaterien.

**[0003]** Bei der Analyse der Reflexionscharakteristiken von Solarspiegelmaterien sind insbesondere der hemisphärische Reflexionsgrad sowie der gerichtete Reflexionsgrad des Materials von Interesse. Weitere Charakteristiken sind die wellenlängenabhängige Streuung sowie die Reflexionsverteilung bei unterschiedlichen Einfallswinkeln und ihre Polarisationsabhängigkeit.

**[0004]** Der wichtigste Parameter für die Eignung eines Spiegels für konzentrierende Solartechnik ist ein solargewichteter, gerichteter Reflexionsgrad. Dafür ist die hemisphärische Messung des Reflexionsspektrums im solaren Wellenlängenbereich ( $\lambda = 250 - 2500 \text{ nm}$ ) nötig, damit eine Gewichtung von diesem mit dem genormten Sonnenspektrum (ASTM G 273) durchgeführt werden kann.

**[0005]** Der gerichtete Reflexionsgrad wird zumeist mit herkömmlichen Reflektometern gemessen. Dabei wird die Spiegelmaterialeprobe mit einem definierten Lichtstrahl mit einem Einfallswinkel  $\vartheta_i$  beleuchtet und das in die Richtung der gerichteten Reflexion mit dem Ausfallswinkel  $\vartheta_a = \vartheta_i$  reflektierte Licht wird von einem Detektor empfangen.

**[0006]** Bei einer solchen Messung ist der Bereich, welcher die gerichtete Reflexion definiert, immer von der Mess-Apertur (entweder die Detektorgröße oder eine vorgesezte Akzeptanzblende) abhängig. Der Radius der Mess-Apertur erzeugt einen Akzeptanzwinkel  $\varphi$ , welcher bei einigen Messverfahren in festen Schritten gewählt werden kann. Eine solche Messung enthält jedoch nicht nur die schmale Verteilung des gerichteten Reflexes, sondern auch einen unbestimmten Anteil von möglicherweise vorhandener Streuung. Andererseits kann ein sehr breiter, gerichteter Reflex auch abgeschnitten werden oder je nach Zentrierung in der Mess-Apertur unterschiedlich bewertet werden.

**[0007]** Zur Ermittlung des Reflexionsspektrums im solaren Wellenbereich werden zurzeit Spektrophotometer oder Fourier-Transformations-Spektrometer eingesetzt. Zusammen mit einer Integrationskugel gelingt die Messung des hemisphärischen Reflexionsgrads spektral aufgelöst und mit hoher Genauigkeit. Derartige Messungen eignen sich jedoch weniger gut für gerichtete Reflexionsmessungen von Proben, deren Reflexionsverhalten nicht perfekt spiegelnd ist. Die Ermittlung des solargewichteten, gerichteten Reflexionsgrads  $\varphi_s$  von Solarspiegeln unter einem bestimmten Akzeptanzwinkel erfolgt daher zurzeit durch eine Kombination beider Messungen, wobei jedoch nur ein angenäherter Wert ermittelt werden kann. Dieser angenäherter Wert wird als Qualitätsparameter für die Bewertung von Solarspiegelmaterien verwendet, was jedoch größere Ungenauigkeiten beinhaltet und einige Spiegelmaterien benachteiligen kann.

**[0008]** Das gerichtete Reflexionsverhalten der Spiegelprobe wird nur unter eingeschränkten Bedingungen bezüglich aller drei relevanten Parameter, des Akzeptanzwinkels, der Wellenlänge und des Einfallswinkels, betrachtet. Für einige Typen von Spiegeln treten jedoch große Messunsicherheiten auf und ihre Eigenschaften werden mit den begrenzten Akzeptanzwinkeln nur ungenügend charakterisiert.

**[0009]** Für diffus reflektierende Materialien ist es ferner bekannt, eine bidirektionale Verteilungsfunktion zu bestimmen. Dafür kann beispielsweise ein rasterndes Goniometer verwendet werden. Bei diesem wird die Probe unter einem bestimmten Einfallswinkel beleuchtet und das reflektierte Licht wird von einem Detektor empfangen. Der Detektor fährt dabei den oberhalb der Probe befindlichen Raum schrittweise ab und ermittelt eine Intensitätsmatrix aus vielen Messpunkten, mit welcher die Verteilungsfunktion der reflektierten Strahlung abgeleitet werden kann. Die Lichtquelle kann ebenfalls beweglich ausgestaltet sein, so dass unterschiedliche Einfallswinkel realisiert werden können. Um eine sehr feine Raumwinkelauflösung gewährleisten zu können, muss das System entsprechend groß ausgelegt werden und es wird eine sehr präzise Mechanik notwendig. Mit der ansteigenden Zahl der Messpunkte und damit zunehmender Winkelauflösung verlängert sich die Messzeit quadratisch.

**[0010]** Es besteht somit grundsätzlich das Problem, dass eine qualitative Bewertung der Reflexionseigenschaften von Spiegelmaterien für die Solaranwendung nur angenähert wird. Es ist bisher kein System bekannt, mit dem der solargewichtete, gerichtete Reflexionsgrad bei einem beliebigen, definierten Akzeptanzwinkel direkt gemessen werden kann.

**[0011]** In der Praxis werden bei der Messung der gerichteten Reflexion häufig zu große Akzeptanzwinkel

verwendet, so dass der gerichtete, reflektierte Strahl und daneben liegende Streuung nicht voneinander unterschieden werden können. Kommerziell verfügbare Reflektometer verfügen darüber hinaus häufig nur über wenige diskrete Akzeptanzwinkel. Eine Messung mit einem derartigen Gerät wird jedoch der Anwendung eines Spiegels zur Verwendung in konzentrierender Solartechnik nicht gerecht, da unter Umständen auch gestreute Anteile neben dem gerichteten Hauptreflex zum Energiegewinnungsprozess beitragen, in anderen Fällen jedoch verloren gehen können. Dies betrifft vor allem anisotropische Reflexionseigenschaften, die für punktfokussierende Solar Kollektoren zu größeren Verlusten führen als bei linienfokussierenden Systemen. Kleine Akzeptanzblenden verschlechtern ferner bei nicht-perfekten Spiegeln die Messgenauigkeit erheblich.

**[0012]** Bei den bekannten Messverfahren kann der gerichtete Reflexionsgrad ferner nur unzureichend wellenlängenabhängig gemessen werden. Das bekannte Verfahren zur Bestimmung des gerichteten Reflexionsgrades beruht auf der Annahme, dass Reflexionsverluste durch Streuung, Wellenlängen-unabhängig und daher über das Spektrum näherungsweise konstant sind. Dies entspricht jedoch nicht der Realität.

**[0013]** Schließlich werden Messungen mit herkömmlichen Reflektometern zumeist bei Einfallswinkeln nahe dem senkrechten Einfall gemessen (zwischen  $5^{\circ}$ – $15^{\circ}$  von der Senkrechten). In der Realität treten an einem Solarkollektor allerdings auch deutlich größere Einfallswinkel auf und einige Spiegelmaterialien unterscheiden sich gerade bei flachen Einfallswinkeln erheblich.

**[0014]** Die Bestimmung der bidirektionalen Verteilungsfunktion über ein Goniometer kann theoretisch diese Probleme zumindest ansatzweise lösen. Allerdings sind die Spiegelmaterialproben hochgradig spiegelnd, so dass übliche Goniometer in der Regel nur bedingt geeignet sind.

**[0015]** Es hat sich ferner herausgestellt, dass für die Bestimmung der Form des sehr schmalen, gerichteten Reflexes eine sehr hohe Raumwinkelauflösung notwendig ist, damit die ermittelte Verteilungsfunktion mit dem hemisphärischen Reflexionsgrad korreliert werden kann. Aufgrund von Mechanik und Detektorgröße ist ein großer Messabstand erforderlich, um hohe Raumwinkelauflösungen zu erreichen, so dass geeignete Goniometer sehr große Gerätedimensionen besitzen müssten. Ferner würde die Dauer einer Messung mit einem derartigen Goniometer aufgrund der großen Datenmenge mehrere Minuten bis Stunden betragen.

**[0016]** Aus Gregory J. Ward: Measuring and Modeling Anisotropic Reflection, Computer Graphics 26, 2,

July 1992, 265–272 ist ein Messsystem zur Bestimmung von Reflexionscharakteristiken bekannt, das die Merkmale des Oberbegriffs von Anspruch 1 aufweist.

**[0017]** Dieses Messsystem ist jedoch für die Bestimmung von Reflexionscharakteristiken von hochpolierten, spiegelnden Materialien, die für Solarspiegel verwendet werden, nur eingeschränkt verwendbar. US 6,577,397 offenbart ein Messsystem mit einer Haube, die einen Projektionsschirm bildet.

**[0018]** Es ist daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Messsystem zur Bestimmung von Reflexionscharakteristiken von Solarspiegelmaterialien zu schaffen, mit dem die Reflexionscharakteristiken mit hoher Genauigkeit und sehr schnell bestimmbar sind. Darüber hinaus soll das Messsystem eine hohe Raumwinkelauflösung ermöglichen und dennoch möglichst geringe Außenmaße aufweisen.

**[0019]** Es ist ferner die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein verbessertes Verfahren zur Qualitätsbestimmung einer Spiegelmaterialprobe zur Verfügung zu stellen.

**[0020]** Das erfindungsgemäße Messsystem ist definiert durch die Merkmale des Anspruchs 1. Das erfindungsgemäße Verfahren ist definiert durch die Merkmale des Anspruchs 14.

**[0021]** Das erfindungsgemäße Messsystem zur Bestimmung von Reflexionscharakteristiken von Solarspiegelmaterialien weist einen Spiegelhalter zur Aufnahme einer Spiegelmaterialprobe und einen Strahlungsdetektor mit einem Bildsensor und einer Empfangsoptik zur Aufnahme von von der Spiegelmaterialprobe reflektiertem Licht auf. Ferner ist eine Haube vorgesehen, die einen Innenraum begrenzt und die eine verspiegelte Innenfläche aufweist, wobei die verspiegelte Innenfläche semi-ellipsoid-förmig ausgebildet ist und einen ersten und einen zweiten Brennpunkt aufweist, wobei der erste und der zweite Brennpunkt in dem Innenraum der Haube angeordnet sind. Die Spiegelmaterialprobe ist über den Spiegelhalter in dem ersten Brennpunkt anordenbar und die Empfangsoptik des Strahlungsdetektors ist in dem zweiten Brennpunkt angeordnet. Das Messsystem weist eine Lichtquelle und einen mit der Lichtquelle verbundenen Strahlungseinkoppler zur Erzeugung eines auf die Spiegelmaterialprobe gerichteten Lichtstrahls auf. Der Strahlungseinkoppler ist an einer Führungsvorrichtung zur Führung des Strahlungseinkopplers entlang einer vorgegebenen Führungsbahn angeordnet. Die semi-ellipsoid-förmige Haube weist ferner mindestens eine Aussparung oder mindestens einen transparenten Bereich auf, über die bzw. den der Lichtstrahl in den Innenraum der Haube einleitbar ist. Der transparente Bereich kann auch semi-transparent sein.

**[0022]** Das erfindungsgemäße Messsystem ermöglicht eine neue Herangehensweise für die Bestimmung des gerichteten Reflexionsgrades. Der in den Innenraum der Haube eingeleitete Lichtstrahl wird von der Spiegelmaterialprobe reflektiert und in Richtung der verspiegelten Innenfläche gestrahlt. Diese reflektiert das Licht wiederum in Richtung des Strahlungsdetektors. Da der Strahlungsdetektor mit Bildsensor mit seiner Empfangsoptik im zweiten Brennpunkt angeordnet ist, kann über die Empfangsoptik nahezu sämtliches von der Spiegelinnenfläche reflektiertes Licht erfasst werden. Durch das Vorsehen eines Bildsensors wird nahezu der gesamte Innenraum gleichzeitig mittels des Strahlungsdetektors aufgenommen. Das erfindungsgemäße Messsystem ermöglicht somit eine kontinuierliche Messung der Reflexionsverteilung, wodurch der bei Verfahren gemäß Stand der Technik vorliegende Informationsverlust sowie die Messungenauigkeit bei der gerichteten Reflexionsmessung mit undefinierten oder limitierten Akzeptanzwinkeln vermieden wird. Durch die Verwendung des Bildsensors können anisotropische Streumerkmale der Spiegelmaterialprobe berücksichtigt werden, da durch die Verwendung eines Bildsensors eine Auflösung in zwei orthogonale Winkelrichtungen möglich ist.

**[0023]** Durch das Vorsehen einer Führungsvorrichtung zur Führung des Strahlungseinkopplers entlang einer vorgegebenen Führungsbahn können nahezu beliebige Einfallswinkel des auf die Spiegelmaterialprobe gerichteten Lichtstrahls ermöglicht werden.

**[0024]** Im Gegensatz zu rasternden Goniometern, die üblicherweise eine sehr lange Messdauer besitzen, kann mittels des erfindungsgemäßen Messsystems eine Bestimmung von Reflexionscharakteristiken sehr schnell durchgeführt werden, da mittels des Strahlungsdetektors mit Bildsensor zumeist eine einzige oder wenige Aufnahmen ausreichen. Dabei entspricht die Pixelposition des reflektierten Lichts auf dem Bildsensor dem Reflexionsraumwinkel an der Probe, definiert durch Azimutwinkel und Polarwinkel. Die Aussparung in der semi-ellipsoid-förmigen Haube ermöglicht das Einleiten des Lichtstrahles in den Innenraum der Haube auf eine einfache Art und Weise. Je nach Einsatzzweck des erfindungsgemäßen Messsystems kann jedoch auch das Vorsehen eines transparenten Bereiches zur Einleitung des Lichtstrahls in den Innenraum der Haube von Vorteil sein. Selbstverständlich kann die Aussparung durch ein transparentes Material ausgefüllt sein, so dass der Lichtstrahl in vorteilhafter Weise in den Innenraum der Haube eingeleitet werden kann, ohne dass Fremdkörper in den Innenraum gelangen können.

**[0025]** In einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung ist vorgesehen, dass die mindestens eine Aussparung schlitzförmig ausgebildet ist. Bei der Verwendung eines Messsystems mit einem transpa-

renten Bereich kann der transparente Bereich streifenförmig ausgebildet sein. Auf diese Weise können die Lichtstrahlen in vorteilhafter Weise in unterschiedlichen Einfallswinkeln auf die Spiegelmaterialprobe gerichtet werden.

**[0026]** In einem besonders bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung ist vorgesehen, dass die mindestens eine Aussparung in der über der Spiegelprobe angeordneten Hälfte der Haube angeordnet ist, wobei die Aussparung bis zu einer Stelle der Haube, die durch einen Schnittpunkt einer orthogonal auf die Spiegelprobe verlaufenden Achse mit der Haube gebildet ist, erstreckt. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass der Lichtstrahl in einem großen Einfallswinkelbereich auf die Spiegelprobe gerichtet werden kann und die von der Spiegelprobe reflektierten Strahlen von der verspiegelten Innenfläche in Richtung des zweiten Brennpunktes und somit zu dem Strahlungsdetektor reflektiert werden.

**[0027]** Die Erfindung sieht in vorteilhafter Weise vor, dass die Innenfläche der Haube eine Winkelabweichung der Flächennormale an jedem Punkt der Innenfläche von maximal 0,5 mrad von der idealen Flächennormalen und/oder eine Oberflächenrauheit von maximal 150 nm, vorzugsweise maximal 30 nm, besitzt. Es hat sich herausgestellt, dass eine derartige hohe Präzision der optischen Form eine besonders genaue Messung ermöglicht. Die geringe Rauheit der Innenfläche ist notwendig, um die Streuung des Lichtes bei der Reflexion von der Innenfläche so gering wie möglich zu halten. Derartig genaue Oberflächen können beispielsweise durch eine sehr genaue Herstellung eines Rohkörpers und anschließenden Nachbearbeitung und Polieren mit einer hochpräzisen Diamant-Drehbank erreicht werden.

**[0028]** Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass der Strahlungseinkoppler als Kollimator, vorzugsweise Reflexionskollimator, ausgebildet ist, wobei der Kollimator über einen Lichtleiter mit der Lichtquelle verbunden ist. Selbstverständlich ist es auch möglich, dass der Strahlungseinkoppler direkt an der Lichtquelle angeordnet ist und die Lichtquelle zusammen mit dem Strahlungseinkoppler mittels der Führungsvorrichtung entlang der Führungsbahn bewegbar ist.

**[0029]** Das Vorsehen eines Kollimators als Strahlungseinkoppler ermöglicht die Erzeugung eines hochpräzisen Lichtstrahls auf die Spiegelmaterialprobe. Dadurch, dass der Kollimator über einen Lichtleiter mit der Lichtquelle verbunden ist, kann der Strahlungseinkoppler unabhängig von der Lichtquelle in vorteilhafter Weise entlang der Führungsbahn bewegt werden. Darüber hinaus können unterschiedliche Lichtquellen mit dem Lichtleiter verbunden werden, so dass das erfindungsgemäße Messsystem sehr flexibel einsetzbar ist. Es können beispielsweise Messungen sowohl im Weißlicht oder Sonnenspek-

trum als auch in bestimmten Wellenlängenbändern durch den Einsatz von Spektralfiltern oder monochromatischen Lichtquellen ermöglicht werden.

**[0030]** Die Führungsbahn der Führungsvorrichtung kann außerhalb der Haube und/oder gekrümmt angeordnet sein, wobei die Führungsbahn vorzugsweise parallel zu der Innenfläche der Haube verläuft. Dadurch kann der Strahlungseinkoppler in besonders vorteilhafter Weise während einer Messung bewegt werden, so dass die Einstellung unterschiedlicher Strahlungseinfallswinkel auf die Spiegelmaterialprobe auf besonders einfache Art und Weise ermöglicht wird.

**[0031]** Die Empfangsoptik des Strahlungsdetektors kann ein Fischaugenobjektiv aufweisen. Die Verwendung eines Fischaugenobjektivs ermöglicht, dass Lichtstrahlen mit einem Blickwinkel von nahezu 180° pro Winkelrichtung formatfüllend auf den Bildsensor abgebildet werden können.

**[0032]** In einer besonders bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist vorgesehen, dass an der Innenfläche der Haube ein Schattenband verschwenkbar angeordnet ist, wobei das Schattenband parallel zu der Innenfläche verläuft und vorzugsweise die Breite des Lichtstrahls aufweist. Das Schattenband kann somit durch den Strahlengang geschwenkt werden, so dass der Hauptreflex ausgeblendet wird. Dadurch ist der komplette Dynamikumfang des Detektors für den relativ schwachen Streuanteil der spiegelnden Probe verwendbar, wodurch das Signal-Rauschverhältnis in den lateralen Bereichen der Streuverteilung erheblich gesteigert wird. Dadurch ist eine sehr genaue Messung von Spiegelmaterialproben möglich.

**[0033]** Der Spiegelhalter kann als Dreipunkthalterung ausgebildet sein. Dadurch ist die Probenhalterung sehr variabel, so dass die Spiegelebene der Spiegelmaterialprobe präzise in dem ersten Brennpunkt des Semi-Ellipsoids positioniert werden kann. Die Spiegelmaterialprobe kann somit sehr genau ausgerichtet werden.

**[0034]** Es kann ferner vorgesehen sein, dass der Spiegelhalter um eine durch den ersten Brennpunkt verlaufende Schwenkachse, die orthogonal zu einer Lichteinfallebene auf dem Spiegel verläuft, neigbar ausgebildet ist. Bei sehr flachen Einfallswinkeln wird der Hauptreflex bei parallel zur Fokusebene ausgerichteter Probe an den unteren Rand des Ellipsoids geworfen. Die Reflexion erfolgt somit in einem sehr flachen Winkel zu dem Strahlungsdetektor und der Empfangsoptik. Dadurch unterliegt der Strahlengang stärkeren optischen Fehlern an der Innenfläche und an der Empfangsoptik. Durch die Möglichkeit, den Spiegelhalter zu neigen, kann der Hauptreflex für flache Einfallswinkel in eine zentralere Region des Se-

mi-Ellipsoids gelenkt werden, so dass der Strahlengang in einem vorteilhafteren Winkel in Richtung des Strahlendetektors gelenkt wird. Dadurch können optische Fehler vermieden werden.

**[0035]** Die Erfindung sieht in vorteilhafter Weise vor, dass der Strahlungsdetektor eine Verstelleinrichtung aufweist, über die der Strahlungsdetektor entlang einer durch den zweiten Brennpunkt verlaufenden Achse verstellbar ist. Der Strahlungsdetektor ist somit höhenverstellbar. Die Position des Eintrittsbereichs der Empfangsoptik des Strahlungsdetektors kann dadurch in den Innenraum hinein und aus diesem heraus verschoben werden. Somit können auch Strahlen, die vom äußeren Rand des Ellipsoids reflektiert werden, mit gleicher Qualität abgebildet werden wie Strahlen, die aus der Zentrumsregion kommen. Eine Messung mit dem erfindungsgemäßen Messsystem kann beispielsweise aus drei bis fünf Aufnahmen bestehen, wobei der Strahlungsdetektor für jede Aufnahme jeweils weiter in den Innenraum hinein verschoben wird. Die verschiedenen Aufnahmen werden zu einem späteren Zeitpunkt bei der Bestimmung der bidirektionalen Verteilungsfunktion kombiniert. Auf diese Weise kann eine korrekte bidirektionale Verteilungsfunktion des gesamten Innenraums aufgenommen werden.

**[0036]** Der Bildsensor kann beispielsweise eine Mindestgröße von einem  $\frac{3}{4}$ " aufweisen, wobei der Bildsensor vorzugsweise ein Füllfaktor  $> 80\%$  aufweist. Dabei besitzt der Bildsensor eine Auflösung von mindestens 8 Megapixeln. Durch die Verwendung eines derartigen Bildsensors kann eine sehr hohe Raumwinkelauflösung erreicht werden. Für eine genaue Bestimmung der bidirektionalen Verteilungsfunktion ist beispielsweise eine Auflösung von ca. 785 nsr pro Pixel notwendig. Dies wird durch den erfindungsgemäß verwendeten Chip-Bildsensor erreicht. Dabei kann der Bildsensor beispielsweise als Monochrom-Chip ausgebildet sein. Der hohe Füllfaktor ist von Vorteil, da die optisch wirksame Fläche des Bildsensors dadurch möglichst wenig durch Auslesepixel oder inaktive Flächen unterbrochen ist.

**[0037]** In einem besonders bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung ist vorgesehen, dass der erste und der zweite Brennpunkt einen Abstand zwischen 60 mm und 80 mm, vorzugsweise 74 mm, aufweisen. Mit anderen Worten: Die Semi-Ellipsoid-Form der Innenfläche ist einer Halbkugel angenähert. Der Abstand zwischen den beiden Brennpunkten ist dabei so gewählt, dass eine Spiegelmaterialprobe mit einem Durchmesser von ca. 50 mm neben der Empfangsoptik des Strahlungsdetektors angeordnet werden kann.

**[0038]** Als Lichtquelle kann beispielsweise eine Halogenlampe verwendet werden. Vor der Einkopplung in den Lichtleiter können Spektralfilter sowie Pola-

risationsfilter vorgeschaltet sein. Alternativ besteht die Möglichkeit, dass die Lichtquelle aus verschiedenen monochromatischen LED-Lichtquellen besteht, an welchen die Lichtleiter nacheinander angekoppelt werden.

**[0039]** Der Strahlungsdetektor kann beispielsweise eine Kamera sein.

**[0040]** Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Qualitätsbestimmung einer Spiegelmaterialprobe. Dabei sind folgende Schritte vorgesehen:

- Bestimmung des spektralen Gesamtreflexionsgrades der Spiegelmaterialprobe sowie dessen solare Gewichtung,
- Bestimmung einer Verteilungsfunktion der reflektierten Strahlung,
- Korrelieren des Gesamtreflexionsgrades mit der Verteilungsfunktion zur Bestimmung des gerichteten Reflexionsgrades als Funktion des Akzeptanzwinkels,
- Charakterisierung der Spiegelmaterialprobe anhand dieser Funktion.

**[0041]** Der gerichtete Reflexionsgrad als Funktion des Akzeptanzwinkels ist somit unabhängig von fixen Akzeptanzwinkeln oder deren Messgenauigkeit. Man erhält somit einen Reflexionsgrad in jedem Raumwinkel. Dadurch ist eine Charakterisierung der Spiegelmaterialprobe in besonders vorteilhafter Weise möglich. Das erfindungsgemäße Verfahren kann vorsehen, dass bei der Bestimmung der Verteilungsfunktion der reflektierten Strahlung ein erfindungsgemäßes Messsystem verwendet wird.

**[0042]** Ferner kann das erfindungsgemäße Verfahren vorsehen, dass bei der Charakterisierung der Spiegelmaterialprobe eine Auswertung des gerichteten Reflexionsgrades unter Verwendung einer virtuellen runden Blende oder einer virtuellen Spaltblende erfolgt. Dadurch kann eine spezifische Analyse in Bezug auf punktfokussierende oder linienfokussierende Solarkollektoren durchgeführt werden. Die Verwendung einer virtuellen Spaltblende führt zu einer sinnvoller Bewertung für Spiegel, die in linienfokussierenden Systemen eingesetzt werden. Bei derartigen Systemen haben anisotropische Reflexionsverteilungen weniger Einfluss auf die Effektivität.

**[0043]** In einem Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens ist vorgesehen, dass bei der Bestimmung der Verteilungsfunktion der reflektierten Strahlung eine Beleuchtung der Spiegelmaterialprobe in verschiedenen Spektralbereichen oder im Weißlicht zur Bestimmung einer Wellenlängenabhängigkeit des Streuverhaltens der Reflexion erfolgt, wobei der gerichtete Reflexionsgrad zusätzlich als Funktion des Spektralbereiches bestimmt wird. Man erhält somit einen gerichteten Reflexionsgrad mit spektraler Information, wodurch eine Charakterisie-

rung der Spiegelmaterialprobe zusätzlich anhand der spektralen Information vorgenommen werden kann. Das erfindungsgemäße Verfahren ist diesbezüglich lediglich durch die Empfindlichkeit des Strahlungsdetektors limitiert. Bei zurzeit verfügbaren Detektoren ist somit die Abhängigkeit nicht im gesamten Spektralbereich des Sonnenlichts möglich, jedoch zumindest im Bereich der größten Gewichtung bis zu einer Wellenlänge von ca. 1000 nm.

**[0044]** Im Folgenden wird unter Bezugnahme auf die nachfolgenden Figuren die Erfindung näher erläutert.

**[0045]** Es zeigen:

**[0046]** **Fig. 1** eine schematische Schnittdarstellung eines erfindungsgemäßen Messsystems und

**[0047]** **Fig. 2** eine schematische Draufsicht auf ein erfindungsgemäßes Messsystem.

**[0048]** In den Figuren ist ein erfindungsgemäßes Messsystem **1** zur Bestimmung von Reflexionscharakteristiken von Solarspiegelmaterialien schematisch dargestellt. Das Messsystem **1** weist eine Haube **3** auf, die einen Innenraum **5** begrenzt. Die Haube **3** weist eine verspiegelte Innenfläche **7** auf, wobei die Innenfläche **7** semi-ellipsoid-förmig ausgebildet ist. Auf der der Innenfläche **7** gegenüberliegenden Seite ist der Innenraum **5** durch eine Deckelplatte **9** begrenzt. Die Deckelplatte **9** ist zum Innenraum **5** hin lichtabsorbierend ausgestaltet.

**[0049]** Die verspiegelte Innenfläche weist einen ersten Brennpunkt **11** und einen zweiten Brennpunkt **13** auf, die auf einer gemeinsamen Brennpunktebene **15** angeordnet sind.

**[0050]** An der Deckelplatte **9** ist ein Spiegelhalter **17** angeordnet, der eine Spiegelmaterialprobe **19** hält. Der Spiegelhalter **17** ist dabei derart an der Deckelplatte **9** angeordnet, dass die Probe **19** mit ihrer Spiegelfläche **21** in dem ersten Brennpunkt **11** angeordnet ist. Ferner weist das erfindungsgemäße Messsystem **1** einen Strahlungsdetektor **23** auf, der einen Bildsensor **25** und eine Empfangsoptik **27** besitzt. Der Strahlungsdetektor **23** ist dabei derart an der Deckelplatte **9** angeordnet, dass die Empfangsoptik **27** im zweiten Brennpunkt **13** angeordnet ist. Die Empfangsoptik **27** kann beispielsweise ein Fischaugenobjektiv sein.

**[0051]** Die Haube **3** weist eine schlitzförmige Aussparung **29** auf, über die ein Lichtstrahl **31** in den Innenraum **5** der Haube **3** eingeleitet werden kann. Die Aussparung ist dabei derart an der Haube angeordnet, dass die Aussparung sich bis zu einer Stelle der Haube **3** erstreckt, die durch einen Schnittpunkt einer orthogonal auf die Spiegelprobe **19** verlaufende Achse **33** gebildet ist.

**[0052]** Zur Einleitung des Lichtstrahls **31** in den Innenraum weist das Messsystem eine Lichtquelle **35** und einen über einen Strahlungsleiter **37** mit der Lichtquelle **35** verbundenen Strahlungseinkoppler **39** auf. Der Lichtleiter **37** kann beispielsweise eine Glasfaserleitung sein. Dem Lichtleiter **37** können ferner Filter **41**, wie beispielsweise Farbfilter oder Polarisationsfilter, vorgeschaltet sein. Selbstverständlich können die Filter **41** auch an einer anderen Stelle im Strahlungsverlauf angeordnet sein. Der Strahlungseinkoppler **39** kann beispielsweise ein Reflexionskollimator sein, über den ein gerichteter Lichtstrahl **31** erzeugbar ist.

**[0053]** Der Strahlungseinkoppler **39** ist auf einer Führungsvorrichtung **43** angeordnet, mittels der der Strahlungseinkoppler **39** auf einer Führungsbahn **45** bewegt werden kann. Dazu ist der Strahlungseinkoppler **39** an einem Schlitten **47** befestigt, der entlang der Führungsbahn **45** verfahren werden kann. Auf diese Weise lassen sich unterschiedliche Einfallswinkel des Lichtstrahls **31** auf die Probe **19** erzeugen. Beispielsweise können Einfallswinkel von ca.  $5^{\circ}$ – $60^{\circ}$  eingestellt werden.

**[0054]** Die Lichtquelle **35** kann Weißlicht erzeugen oder eine monochromatische Lichtquelle sein.

**[0055]** Die Führungsbahn **45** erstreckt sich entlang einer Kreisbahn mit einem Mittelpunkt im ersten Brennpunkt **11**.

**[0056]** Der Spiegelhalter **17** kann als Dreipunkthalterung ausgebildet sein, wobei über Stellschrauben **49** eine sehr genaue Positionierung der Spiegelmaterialprobe **19** in dem ersten Brennpunkt **11** möglich ist. Ferner kann der Spiegelhalter **17** eine nicht dargestellte Neigungsvorrichtung aufweisen, über die der Spiegelhalter **17** um eine durch den ersten Brennpunkt **11** verlaufende Schwenkachse, die orthogonal zu der Lichteinfallsebene auf die Spiegelmaterialprobe verläuft, neigbar ist.

**[0057]** Der Strahlungsdetektor **23** weist eine Verstelleinrichtung **51** auf, über die der Strahlungsdetektor entlang einer durch den zweiten Brennpunkt **13** verlaufenden Achse **53** verstellbar ist.

**[0058]** In dem Innenraum **5** ist ein verschwenkbares Schattenband **55** angeordnet, das parallel zu der Innenfläche **7** verläuft. Das Schattenband **55** hat vorzugsweise die Breite des Lichtstrahls **31**. Über das Schattenband **55** lässt sich der Hauptreflex des Lichtstrahls **31** ausblenden, was in der **Fig. 1** schematisch dargestellt ist.

**[0059]** Der Spiegelhalter **17** kann beispielsweise eine magnetische Halterung für die Spiegelmaterialprobe **19** aufweisen, so dass die Spiegelmaterialprobe

be **19** magnetisch auf der Unterseite des Spiegelhalters **17** befestigbar ist.

**[0060]** Der erste und der zweite Brennpunkt **11**, **13** kann beispielsweise einen Abstand von 74 mm aufweisen. Dabei kann der durch die verspiegelte Innenfläche **7** gebildete Semi-Ellipsoid eine Größe aufweisen, bei der die große Halbachse eine Länge von 345 mm und die kleine Halbachse eine Länge von 343,01 mm besitzt. Das erfindungsgemäße Messsystem hat somit einen Durchmesser von etwa 70 cm und ist somit bequem in einem Labor einsetzbar.

**[0061]** Die Haube **3** kann aus einem Aluminium-Vollkörper in Leichtbauweise hergestellt werden. Die verspiegelte Innenfläche **7** kann beispielsweise durch Diamant-Polieren erschaffen werden, wobei keine weitere verspiegelte Beschichtung erforderlich ist.

**[0062]** Der erste und der zweite Brennpunkt **11**, **13** können beispielsweise einen Abstand von 74 mm voneinander besitzen. Dieser Abstand ist ausreichend, dass die Spiegelmaterialprobe **19** einen Durchmesser von ca. 50 mm aufweisen kann und dennoch der Strahlungsdetektor **23** und die Empfangsoptik **27** in dem zweiten Brennpunkt **13** angeordnet werden können.

**[0063]** Die semi-ellipsoid-förmige Innenfläche **7** lenkt alle nach der Reflexion von der Spiegelmaterialprobe **19** ausgehende Strahlung auf die Empfangsoptik **27** und somit auf den Bildsensor **25**. Dabei entspricht jeder Pixel jeweils einem Reflexionswinkel an der Spiegelmaterialprobe **19**.

**[0064]** Mit dem erfindungsgemäßen Messsystem **1** kann somit eine bidirektionale Verteilungsfunktion des in dem gesamten Halbraum reflektierten Lichts gemessen werden, worüber eine alternative Möglichkeit der Charakterisierung der Spiegelmaterialprobe geschaffen wird. Dazu wird der spektrale Gesamtreflexionsgrad der Spiegelmaterialprobe ebenfalls bestimmt. Der Gesamtreflexionsgrad wird mit der Verteilungsfunktion der reflektierten Strahlung korreliert und es wird ein gerichteter Reflexionsgrad als Funktion des Akzeptanzwinkels erhalten. Darüber lässt sich die Spiegelmaterialprobe in vorteilhafter Weise charakterisieren.

## Patentansprüche

1. Messsystem (1) zur Bestimmung von Reflexionscharakteristiken von Solarspiegelmaterialien mit einem Spiegelhalter (17) zur Aufnahme einer Spiegelmaterialprobe (19), mit einem Strahlungsdetektor (23) mit Bildsensor (25) und einer Empfangsoptik (27) zur Aufnahme von von der Spiegelmaterialprobe (19) reflektiertem Licht, mit einer Haube (3), die einen Innenraum (5) und die eine verspiegelte Innenfläche (7) aufweist, wobei die verspiegelte Innenfläche



che (7) semi-ellipsoid-förmig ausgebildet ist und einen ersten Brennpunkt (11) und einen zweiten Brennpunkt (13) aufweist, wobei der erste und der zweite Brennpunkt (11, 13) in dem Innenraum (5) der Haube (3) angeordnet sind, wobei die Spiegelmaterialprobe (19) über den Spiegelhalter (17) in dem ersten Brennpunkt (11) anordenbar ist und die Empfangsoptik (27) des Strahlungsdetektors (23) in dem zweiten Brennpunkt (13) angeordnet ist, und mit einer Lichtquelle (35) und einem mit der Lichtquelle (35) verbundenen Strahlungseinkoppler (39) zur Erzeugung eines auf die Spiegelmaterialprobe (19) gerichteten Lichtstrahls (31), wobei der Strahlungseinkoppler (39) an einer Führungsvorrichtung (43) zur Führung des Strahlungseinkopplers (39) entlang einer vorgegebenen Führungsbahn (45) angeordnet ist, und wobei die Haube (3) mindestens eine Aussparung (29) oder mindestens einen transparenten Bereich aufweist, über die bzw. den der Lichtstrahl (31) in den Innenraum (5) der Haube (3) einleitbar ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass an der Innenfläche (7) der Haube (3) ein Schattenband (55) verschwenkbar angeordnet ist.

2. Messsystem (1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die mindestens eine Aussparung (29) schlitzförmig, oder dass der mindestens eine transparente Bereich streifenförmig ausgebildet ist.

3. Messsystem (1) nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die mindestens eine Aussparung oder der mindestens eine transparente Bereich in der über der Spiegelprobe (19) angeordneten Hälfte der Haube (3) angeordnet ist, wobei sich die Aussparung (29) oder der transparente Bereich bis zu einer Stelle der Haube (3), die durch einen Schnittpunkt einer orthogonal auf die Spiegelprobe (19) verlaufenden Achse (33) mit der Haube (3) gebildet ist, erstreckt.

4. Messsystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Innenfläche (7) der Haube (3) eine Winkelabweichung der Flächennormale an jedem Punkt der Innenfläche (7) von maximal 0,5 mrad von der idealen Flächennormalen und/oder eine Oberflächenrauheit von maximal 150 nm besitzt.

5. Messsystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Strahlungseinkoppler (39) als Kollimator ausgebildet ist, wobei der Kollimator über einen Lichtleiter (37) mit der Lichtquelle (35) verbunden ist.

6. Messsystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Führungsbahn (45) der Führungsvorrichtung (43) außerhalb der Haube (3) und/oder gekrümmt verläuft.

7. Messsystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Empfangsoptik (27) des Strahlungsdetektors (23) ein Fischaugenobjektiv aufweist.

8. Messsystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass das Schattenband (55) parallel zu der Innenfläche (7) verläuft und vorzugsweise die Breite des Lichtstrahls (31) aufweist.

9. Messsystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Spiegelhalter (17) als Dreipunkthalterung ausgebildet ist.

10. Messsystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Spiegelhalter (19) um eine durch den ersten Brennpunkt (11) verlaufende Schwenkachse, die orthogonal zu einer Lichteinfallsebene auf die Spiegelmaterialprobe (19) verläuft, neigbar ausgebildet ist.

11. Messsystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Strahlungsdetektor (23) eine Verstellereinrichtung (51) aufweist, über die der Strahlungsdetektor (23) entlang einer durch den zweiten Brennpunkt (13) verlaufenden Achse (53) verstellbar ist.

12. Messsystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Bildsensor eine Mindestgröße von  $\frac{3}{4}$ " aufweist, wobei der Bildsensor vorzugsweise einen Füllfaktor > 80% aufweist.

13. Messsystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der erste und der zweite Brennpunkt (11, 13) einen Abstand zwischen 60 mm und 80 mm, vorzugsweise 74 mm, aufweisen.

14. Verfahren zur Qualitätsbestimmung einer Spiegelmaterialprobe (19) mit folgenden Schritten:

- Bestimmung des spektralen Gesamtreflexionsgrades der Spiegelmaterialprobe (19),
- Bestimmung einer Verteilungsfunktion der reflektierten Strahlung,
- Korrelieren des Gesamtreflexionsgrades mit der Verteilungsfunktion der reflektierten Strahlung zur Bestimmung des gerichteten Reflexionsgrades als Funktion des Akzeptanzwinkels,
- Charakterisierung der Spiegelmaterialprobe anhand dieser Funktion.

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Bestimmung der Verteilungsfunktion ein Messsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 13 verwendet wird.

16. Verfahren nach Anspruch 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Charakterisierung der



Spiegelmaterialprobe eine Auswertung des gerichteten Reflexionsgrades unter Verwendung einer virtuellen runden Blende oder einer virtuellen Spaltblende erfolgt.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Bestimmung der Verteilungsfunktion der reflektierten Strahlung eine Beleuchtung der Spiegelmaterialprobe (19) in verschiedenen Spektralbereichen oder im Weißlicht zur Bestimmung einer Wellenlängenabhängigkeit des Streuverhaltens der Reflexion erfolgt, wobei der gerichtete Reflexionsgrad zusätzlich als Funktion des Spektralbereiches bestimmt wird.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

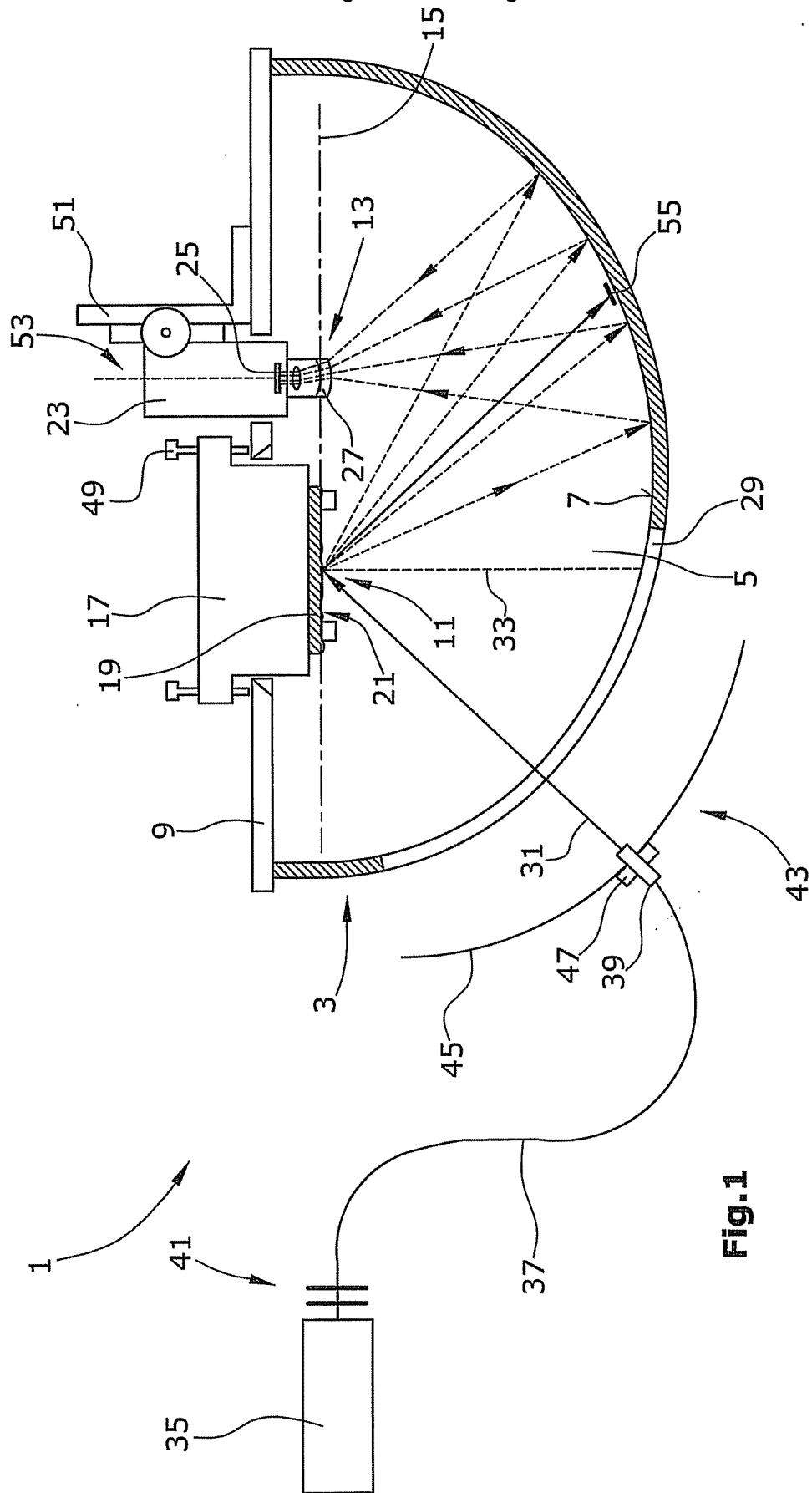
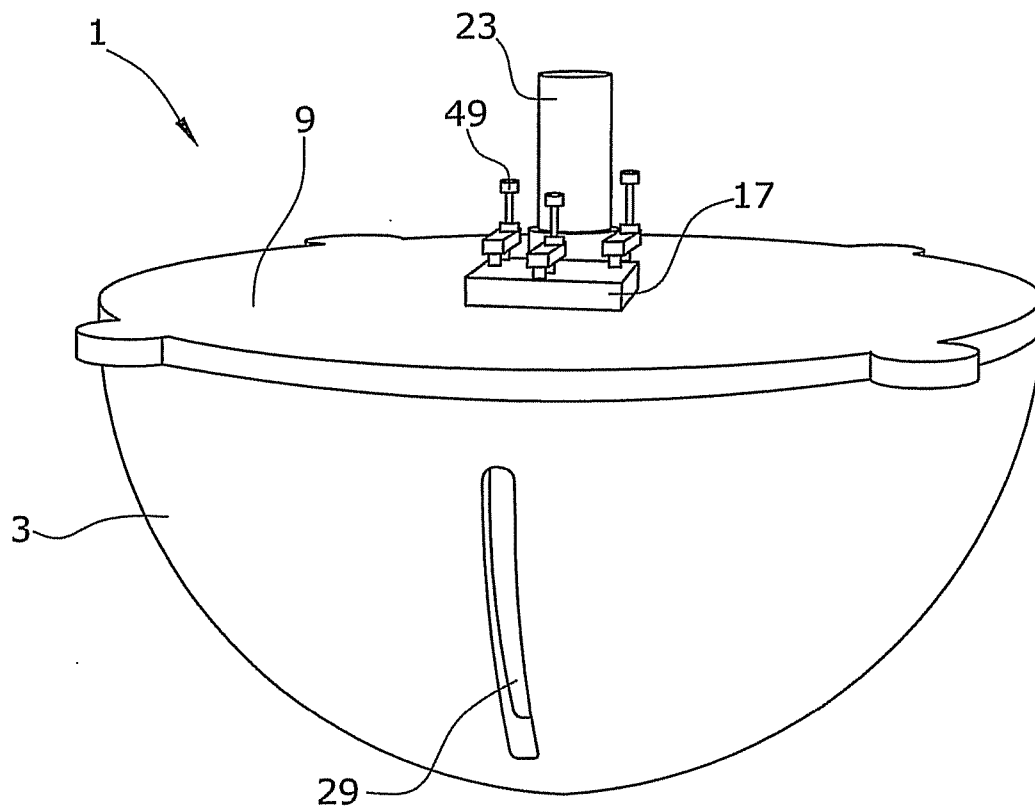


Fig.1



**Fig.2**

